

## СИНТЕЗ И ИССЛЕДОВАНИЕ ДИФРАКЦИОННЫХ ДЕЛИТЕЛЕЙ ПУЧКА С НЕПРЕРЫВНЫМ ПРОФИЛЕМ

Микляев Ю.В.<sup>1</sup>, Имгрунт В.<sup>2</sup>, Павельев В.С.<sup>3,4</sup>, Сойфер В.А.<sup>3,4</sup>, Качалов Д.Г.<sup>4</sup>, Ерополов В.А.<sup>4</sup>, Ашке Л.<sup>2</sup>,  
Большаков М.В.<sup>1</sup>, Лисоченко В.Н.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Южно-Уральский государственный университет

<sup>2</sup>LIMO Lissotschenko Mikrooptik GmbH, Дортмунд, Германия,

<sup>3</sup>Учреждение Российской академии наук

Институт систем обработки изображений Российской академии наук,

<sup>4</sup>Самарский государственный аэрокосмический университет им. академика Королёва  
(национальный исследовательский университет)

### Аннотация

Изготовлены и исследованы дифракционные делители пучка 1:3 и 1:5 с непрерывным профилем микрорельефа для длины волны лазерного излучения 1064 нм. Приведены результаты измерений профиля созданных элементов и распределения интенсивности, формируемые элементами.

**Ключевые слова:** дифракционные делители пучка, дифракционный микрорельеф, порядки дифракции.

### Введение

Дифракционные делители пучка (многопорядковые дифракционные решётки) представляют собой дифракционную структуру с периодическим фазовым микрорельефом и предназначены для формирования одно- или двумерного набора пучков с заданным соотношением энергии между пучками. Делители пучка применяются в оптических устройствах мультипликации изображений, в оптических соединителях для оптоволокон, в устройствах оптической связи и обработки информации, интерферометрии [1,2]. Дифракционные делители пучка формируют один из наиболее востребованных классов дифракционных оптических элементов (ДОО).

В силу доминирования литографических технологий большая часть дифракционных делителей пучка имеет квантованный («ступенчатый») профиль дифракционного микрорельефа, реже – кусочно-непрерывный [3]. Известно большое количество работ, посвящённых разработке методов расчёта квантованного рельефа многопорядковых решёток (например, [4-6]), однако стоит отметить, что квантование профиля – следствие ограничений применяемых технологий и всегда ведёт к потерям энергетической эффективности.

Технология, разработанная фирмой LIMO Lissotschenko Mikrooptik GmbH (Дортмунд, Германия) для производства микролинз [7-11], позволяет получать непрерывный заданный профиль на таких оптических материалах видимого и ближнего ИК диапазонов, как плавленый кварц, ВК-7, CaF<sub>2</sub>, а также на оптических материалах дальнего ИК диапазона – Si, Ge, ZnSe. В данной работе эта технология впервые применялась для формирования непрерывного микрорельефа дифракционных делителей пучка 1:3 и 1:5 на стекле ВК-7. Для расчёта профиля непрерывного микрорельефа делителей пучка применялась численная процедура, основанная на методе [12].

### 1. Формирование и исследование дифракционного микрорельефа с непрерывным профилем

Для изготовления асферических микролинз фирмой LIMO GmbH (г. Дортмунд, Германия) была раз-

работана и на протяжении последних 15 лет постоянно совершенствуется уникальная технология производства, основанная на автоматизированном формировании программируемого профиля линз на поверхности подложки [7-11]. В данной технологии не используются процессы травления, что обеспечивает низкую себестоимость и высокую воспроизводимость непрерывного рельефа линз.

В качестве материала подложки могут использоваться стёкла, полупроводники и кристаллы, например, плавленый кварц, ВК7, фторид кальция CaF<sub>2</sub> для использования в области спектра от вакуумного ультрафиолета до ближнего инфракрасного света, а также кремний Si, германий Ge и селенид цинка ZnSe для фокусировки излучения CO<sub>2</sub> лазеров. По этой технологии могут изготавливаться массивы линз с размерами до 200×200 мм<sup>2</sup> и с точностью изготовления поверхности до 10-100 нм. Апертуры линз покрывают диапазон от 50 мкм до нескольких миллиметров с фокусным расстоянием, изменяемым с точностью, превышающей 1%. Непрерывный контроль качества по всей поверхности подложки осуществляется при помощи профилометра и интегрирован в производственный процесс.

Анализ результатов исследования профиля микролинз [11] показывает, что технология LIMO может быть использована для формирования непрерывного периодического микрорельефа с периодом 10-20 мкм и более. В данной работе технология LIMO применялась для изготовления дифракционных делителей пучка с непрерывным микрорельефом на подложке из стекла ВК-7. Высота микрорельефа дифракционной решётки определяется по формуле:

$$h(x) = \frac{\lambda \varphi(x)}{2\pi(n-1)}, \quad (1)$$

где  $\lambda$  – длина волны освещающего пучка (в нашем случае  $\lambda=1064$  нм),  $n$  – показатель преломления материала подложки ( $n=1,507$ ),  $\varphi(x)$  – фазовая функция решётки, для расчёта которой применялась численная процедура, основанная на методе [12]. В качестве тестовых структур были использованы делители пучка 1:3 с периодами 10 мкм и 20 мкм. На рис. 1 а пока-

зан расчётный профиль структуры (период 20 мкм), а также результат измерения реализованного профиля на силовом микроскопе SolverPro производства компании НТ-МДТ. На рис.1б приведён результат исследования микрорельефа (период 10 мкм) изготовленного элемента с помощью СЗМ-комплекса ИНТЕГРА Аура производства компании НТ-МДТ.

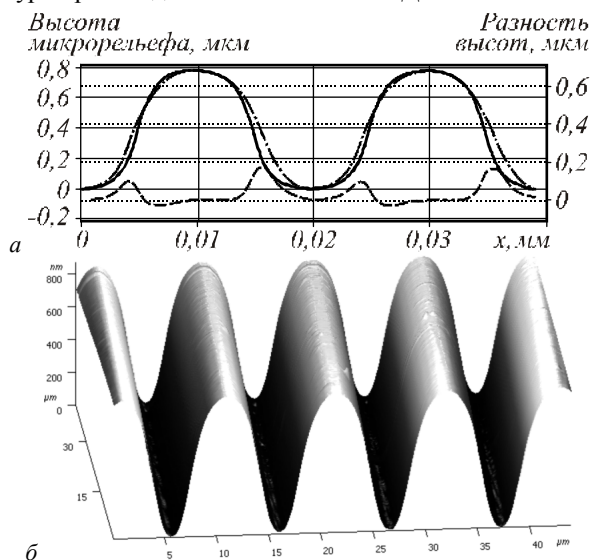


Рис. 1. а) Профиль делителя 1:3, период 20 мкм. Сплошная кривая – теоретический профиль, штрихпунктирная – измеренный профиль, пунктирная кривая – их разность. б) Результат исследования микрорельефа изготовленного элемента

На рис. 2 приведены результаты моделирования расчётного и измеренного профилей (для периода 20 мкм).

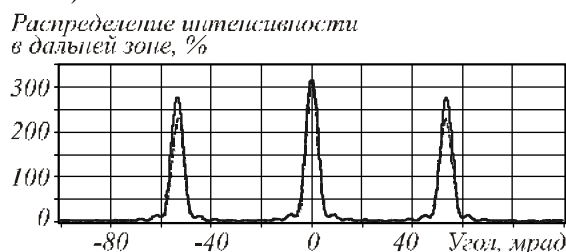


Рис. 2. Результат моделирования профиля делителя пучка 1:3. Пунктирная кривая – результат моделирования измеренного профиля, сплошная кривая – расчётного профиля

Изготовленный делитель пучка 1:3 исследовался методом оптического эксперимента, в ходе которого измерялось распределение интенсивности, формируемое оптическим элементом в дальней зоне. Результат эксперимента приведён на рис. 3.

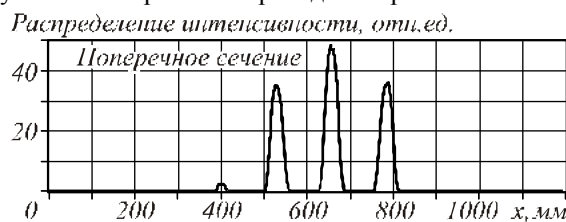


Рис.3. Измеренное сечение распределения интенсивности в дальней зоне

Анализ результатов, представленных на рис. 1-3, позволил внести коррективы в технологический процесс, что дало возможность повысить качество формирования микрорельефа и поставить задачу формирования микрорельефа с более сложной формой профиля.

## 2. Экспериментальное исследование делителя пучка 1:5

На следующем этапе работы был изготовлен и исследован делитель пучка 1:5 с периодом 20 мкм. На рис. 4 а показан расчётный профиль структуры, а также результат измерения реализованного профиля методом сканирующей зондовой микроскопии с помощью силового микроскопа SolverPro производства компании НТ-МДТ.

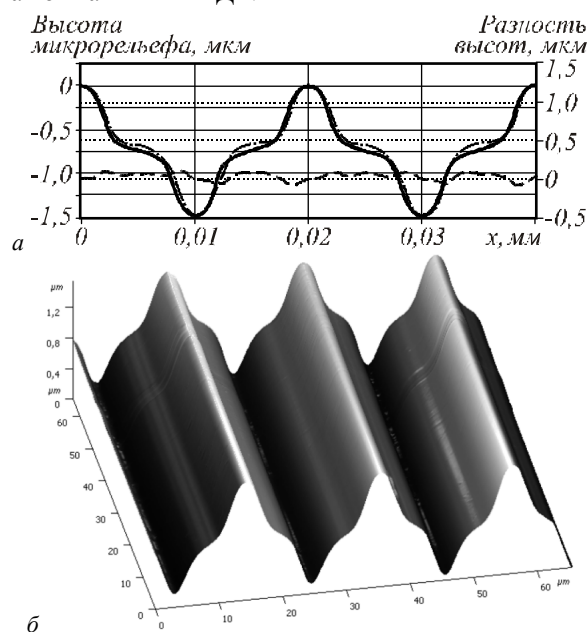


Рис. 4. а) Профиль дифракционного делителя пучка 1:5. Сплошная кривая – теоретический профиль, штрихпунктирная – измеренный профиль, пунктирная кривая – их разность. б) Результат исследования микрорельефа изготовленного элемента

Можно отметить технологические погрешности формирования профиля на рис.4 а, в частности, недостаточно плавные «скаты» периодической структуры. На рис.4 б приведён результат исследования микрорельефа изготовленного элемента с помощью СЗМ-комплекса ИНТЕГРА Аура производства компании НТ-МДТ.

Изготовленный делитель пучка исследовался в ходе оптического эксперимента, схема которого приведена на рис. 5. Использовалось излучение импульсного Nd:YAG лазера с полупроводниковой накачкой ЛТИ-101. Частота следования импульсов составляла 20 Гц, измеренная энергия импульса составляла 0,1 мДж. Для регистрации распределения интенсивности при каждом импульсе лазера использовалась ПЗС матрица 1280×1024 с размером пикселя 7 мкм и с разрешением 12 бит. Результат оптического эксперимента приведён на рис. 6.

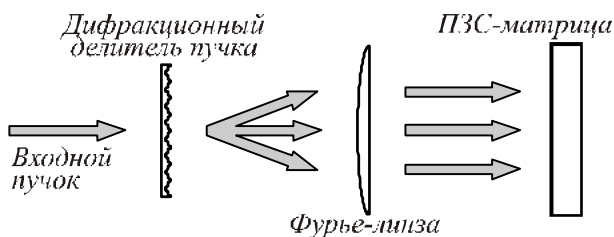
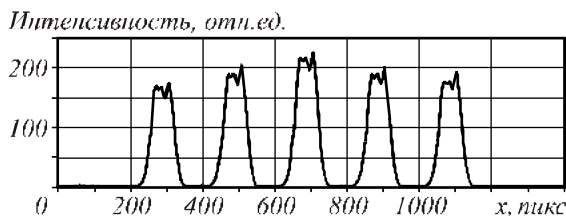
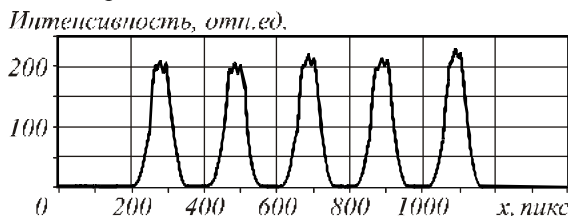


Рис. 5. Схема оптического эксперимента

Рис. 6. Интенсивность, формируемая созданным делителем пучка (угол между направлением падения освещающего пучка и плоскостью установки делителя составляет  $90^\circ$ )

Можно отметить определённую неравномерность распределения интенсивности между дифракционными порядками на рис. 6. Одной из причин появления неравномерности распределения интенсивности является технологическая погрешность реализации рассчитанного профиля (рис. 4 а). Неравномерность распределения (разница интенсивности между самым сильным и самым слабым дифракционными порядками) может быть уменьшена за счёт изменения угла между направлением падения освещающего пучка и плоскостью установки делителя (рис. 7).

Рис. 7. Интенсивность, формируемая созданным делителем пучка (угол между направлением падения освещающего пучка и плоскостью установки делителя составляет  $75^\circ$ )

Кроме измерений сформированного распределения интенсивности в данной работе проводилось измерение энергетической эффективности изготовленных элементов (отношения энергии сформированных рабочих порядков к энергии падающего на делитель пучка). Данное отношение измерялось следующим образом. На выходе делителя помещалась линза, которая собирала излучение всех дифракционных порядков в зрачок фотометра. Дополнительно в плоскости линзы помещалась диафрагма с рядом отверстий, которая пропускала только 3 или 5 дифракционных порядков. Таким образом регистрировалась энергия в «полезных» пучках. Когда делитель убирался из оптического пути, регистрировалась энергия падающего пучка. Результаты изме-

рений энергетической эффективности изготовленных оптических элементов приведены в табл. 1.

Таблица 1

Тип элемента	Энергия освещающего пучка, мДж	Суммарная энергия рабочих порядков*, мДж	Энергетическая эффективность**, %
1:3	0,1	0,088	88
1:5	0,102	0,091	89

\* точность измерения  $\sim 3\%$

\*\* без нанесения антиотражающего покрытия

Анализ полученных экспериментальных результатов показывает целесообразность применения технологии фирмы LIMO для синтеза дифракционных делителей пучка с непрерывным профилем.

### Заключение

Таким образом, в данной работе на основе анализа экспериментальных результатов показано, что технология фирмы LIMO, разработанная для изготовления микролинз, может быть использована для формирования непрерывного микрорельефа многопорядковых дифракционных решёток – делителей пучка. Отметим, что технология может быть использована для формирования в общем случае неперидического непрерывного дифракционного микрорельефа, что позволяет сделать вывод о целесообразности её применения в изготовлении дифракционных оптических элементов (ДОЭ), обладающих высокой энергетической эффективностью, для различных приложений. Развитие предлагаемого подхода к синтезу ДОЭ потребует разработки методов оптимизации микрорельефа ДОЭ, отличных от методов, описанных в [4-6].

Однако отсутствие квантования микрорельефа позволит в перспективе создавать ДОЭ с более высокой энергетической эффективностью, чем позволяют традиционные литографические технологии создания ДОЭ.

### Литература (References)

1. **Loewen, E.G.** Diffraction Gratings and Applications / E.G. Loewen, E. Popov. – Marcel Dekker Inc., 1997. – 601 p.
2. **Reichelt, S.** Self-calibration of wavefront testing interferometers by use of diffractive elements / Stephan Reichelt, Hans Tiziani, Hans Zappe // Proc. of SPIE 2006. – Vol. 6292. – P. 629205.1-629205.10.
3. **Golovashkin, D.L.** Technology of DOE fabrication / In Book: Methods for Computer Design of Diffractive Optical Elements. Chapter 4. / D.L. Golovashkin, N.L. Kazanskiy, V.S. Pavelyev, V.A. Soifer, V.S. Solovyev, G.V. Uspleneyev, A.V. Volkov. – New-York: John Wiley & Sons Inc., 2002. – P. 267-345.
4. **Doskolovich, L.L.** Iterative methods for designing DOEs / In Book: Methods for Computer Design of Diffractive Optical Elements. Chapter 2 / L.L. Doskolovich, V.V. Kotlyar, V.A. Soifer. – New-York: John Wiley & Sons Inc., 2002. – P. 55-158.
5. **Soifer, V.A.** Iterative Methods for Diffractive Optical Elements Computation / V.A. Soifer, V.V. Kotlyar, L.L. Doskolovich. – London: Taylor & Francis Ltd., 1997. – 245 p.

6. **Wyrowski, F.** Diffractive optical elements: iterative calculation of quantized, blazed phase structures / F. Wyrowski // J. Opt. Soc. Am. A., 1990. – Vol. 7(6). – P. 961-963.
7. **Hentze, J.** Process and device for producing optical lenses or the like / J. Hentze, V. Lissotschenko // WO9409389, 1994.
8. **Bizjak, T.** Novel refractive optics enable multipole off-axis illumination / T. Bizjak, T. Mitra, D. Hauschild, L. Aschke // Proc. of SPIE. – 2008 – Vol. 6924 – P. 69242J.
9. **Homburg, O.** Refractive beam shaping: From the solution of the Maxwell equations to products and its applications in laser material processing / O. Homburg, D. Hauschild, L. Aschke, V. Lissotschenko // Proc. of SPIE. – 2008. – Vol. 6663. – P. 66630D.
10. **Homburg, O.** Manufacturing and application of microoptics / O. Homburg, D. Hauschild, V. Lissotschenko // Optik and Photonik. – 2008. – Vol. 4. – P. 48-52.
11. **Bizjak, T.** Inspection and metrology tools benefit from free-form refractive micro-lens and micro-lens arrays / T. Bizjak, T. Mitra, D. Hauschild, L. Aschke // Proc. of SPIE. – 2009. – Vol. 7272. – P. 72723Q.
12. **Romero, L.A.** Theory of optimal beam splitting by phase gratings. I. One-dimensional gratings / L.A. Romero, F.M. Dickey // J. Opt. Soc. Am. A. – 2007. – Vol. 24(8). – P. 2280-2295.

## SYNTHESIS AND INVESTIGATION OF DIFFRACTIVE BEAM SPLITTERS WITH CONTINUOUS PROFILE

*Yu. V. Miklyaev<sup>1</sup>, W. Imgrunt<sup>2</sup>, V.S. Pavelyev<sup>3,4</sup>, V.A. Soifer<sup>3,4</sup>, D.G. Kachalov<sup>4</sup>, V.A. Erolov<sup>4</sup>, L. Aschke<sup>2</sup>, M.V. Bolshakov<sup>1</sup>, V.N. Lissotschenko<sup>2</sup>*

<sup>1</sup> *South-Ural State University, Chelyabinsk, Russia,*

<sup>2</sup> *LIMO Lissotschenko Mikrooptik GmbH, Dortmund, Germany,*

<sup>3</sup> *Image Processing Systems Institute of RAS, Samara, Russia,*

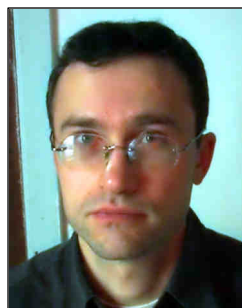
<sup>4</sup> *Samara State Aerospace University, Samara, Russia*

### Abstract

Diffractive beam splitters (1:3 and 1:5) with continuous profile are fabricated and investigated. The results of profile measurements and intensity distribution of the diffractive beam splitters are given. The comparison between theoretical simulations and experimental results shows very good correlation.

Key words: diffractive beam splitters, diffractive microrelief, diffractive orders.

### Сведения об авторах



**Микляев Юрий Владимирович** – доцент кафедры оптики и спектроскопии физического факультета Южно-Уральского университета. Окончил Челябинский госуниверситет в 1993 году по специальности «Радиофизика и электроника». Кандидат физ.-мат. наук по специальности «Радиофизика» с 1997 г. Область научных интересов: динамическая голография, физика фотонных кристаллов, микрооптика.

**Yuri Vladimirovich Miklyaev** the lecturer of chair of optics and spectroscopy of physical faculty of the South Ural University. He graduated the Chelyabinsk State University in 1993 on a specialty "Radio physics and electronics". He received a doctor degree on a specialty of "Radio physics" in 1997. His area of scientific interests: dynamic holography, physics of photon crystals, microoptics.

**Имгрунт Валерий** – главный инженер-технолог производства микрооптики компании LIMO (Lissotschenko Mikrooptik GmbH).

**Waleri Imgrunt** – chief designer of microoptics at LIMO (Lissotschenko Mikrooptik GmbH) company.



**Павельев Владимир Сергеевич**, доктор физико-математических наук, заведующий кафедрой наноинженерии Самарского государственного аэрокосмического университета имени академика С.П. Королёва; главный научный сотрудник Учреждения Российской академии наук Институт систем обработки изображений РАН. Область научных интересов: дифракционная микрооптика и оптические волноводы, нанофотоника и синтез оптических метаматериалов, технологии формирования микро- и наноструктур.

E-mail: [pavelyev@smr.ru](mailto:pavelyev@smr.ru).

**Vladimir Sergeevich Pavelyev**, Doctor of Physical and Mathematical Sciences; Head of Nanoengineering Department of the Samara State Aerospace University named after S.P. Korolyov, chief researcher of the Image Processing Systems Institute of the RAS. Research interests: diffractive microoptics, optical waveguides, nanophotonics, optical metamaterials synthesis, technologies for forming of micro- and nanostructures.



*Сведения об авторе Сойфер В.А. – смотри страницу 10 в этом сборнике.*



**Качалов Денис Георгиевич**, инженер кафедры наноинженерии, м.н.с. научно-образовательного центра нанотехнологий Самарского государственного аэрокосмического университета имени академика С.П. Королёва. Область научных интересов: дифракционная оптика, методы стохастической оптимизации. E-mail: [kachalov@ssau.ru](mailto:kachalov@ssau.ru).

**Denis Georgievich Kachalov**, engineer of Nanoengineering Department and researcher of Research and Educational Center «Nanotechnology» of Samara State Aerospace University named after S.P. Korolyov. Research interests: diffractive optics, methods of stochastic optimization.



**Ерополов Вадим Александрович** – инженер кафедры наноинженерии, м.н.с. научно-образовательного центра нанотехнологий Самарского государственного аэрокосмического университета. Область научных интересов: дифракционная оптика, управление волноводным излучением. E-mail: [eropolov@mail.ru](mailto:eropolov@mail.ru).

**Vadim Alexandrovich Eropolov**, engineer of Nanoengineering Department and researcher of Research and Educational Center «Nanotechnology» of Samara State Aerospace University. Research interests: diffractive optics, waveguide radiation control.



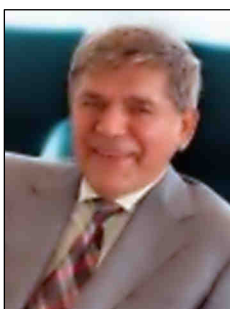
**Ашке Лутц** окончил Рурский университет в Бохуме в 1995 году. В Институте Экспериментальной Физики получил учёную степень доктора в 2000 году. С 2004 года доктор Ашке работает в качестве исполнительного директора на фирме LIMO (Lissotschenko Mikrooptik GmbH). Область научных интересов: физика плазмы, оптика дальнего УФ диапазона и источники излучения коротковолновой части ультрафиолетового спектра.

**Lutz Aschke** graduated from Ruhr University Bochum in 1995. In the Institute of experimental Physics received a doctor degree in 2000. Since 2004 Dr. Lutz Aschke works as a managing director at LIMO (Lissotschenko Mikrooptik GmbH). His scientific background is plasma physics especially DUV optics and EUV light sources.



**Большаков Максим Вячеславович** в 2001 окончил аспирантуру Южно-Уральского государственного университета. В 2007 году защитил диссертацию на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук на тему: «Особенности распространения когерентного поляризованного света в оптических волокнах». С апреля 2008 года по настоящее время занимает должность доцента кафедры оптики и спектроскопии Южно-Уральского государственного университета.

**Maxim Vyacheslavovich Bolshakov** finished postgraduate study in South-Ural State University in 2001. He received his doctor degree in physics and mathematics in 2007. Since 2008 is working as a lecturer in the chair of optics and spectroscopy in the South-Ural State University.



**Лисоченко Виталий Николаевич** с 1977 года работал доцентом в Таганрогском радиотехническом университете, с 1984 – профессором Киевского политехнического университета. С 1986 года работал проректором по науке и заведующим кафедрой электротехники и электроники Киевского политехнического университета. В 1992 году основал компанию LIMO (Lissotschenko Mikrooptik GmbH).

**Vitali Nikolaevich Lissotschenko** worked as a lecturer at Radiotechnical University Taganrog in Russia since 1977. In 1984, he was appointed as a professor to the Polytechnical University of Kiev in the Ukraine. From 1986 he worked there as a deputy rector for scientific work and as the chair of electrical engineering and electronics. In 1992, he founded the company LIMO Lissotschenko Mikrooptik GmbH.

*Поступила в редакцию 29 июля 2010г.*